

OPTIMALIZACE SVOZU A ROZVOZU KUSOVÝCH ZÁSILEK

THE OPTIMIZATION OF PICK-UP AND DELIVERY OF SMALL CONSIGNMENTS

Jaromír Široký, Miroslav Slivoně¹

Anotace: Příspěvek je zaměřen na optimalizaci svozu a rozvozu a identifikaci modelů a metod vhodných pro řešení různých typů úlohy okružních jízd. V těchto svozně-rozvozních systémech je možno definovat problémy strategického, taktického a operativního rozhodování. Jádrem provedené analýzy je rozhodování operativní – tedy vlastní sestava tras vozidel. Byly identifikovány nejdůležitější varianty úlohy okružních jízd, které jsou využitelné pro řešení praktických úloh svozu a rozvozu malých zásilek.

Klíčová slova: optimalizace, svozně-rozvozní úlohy, lokace distribučních terminálů

Summary: This paper deals with vehicle routing problem – the corresponding models and methods are presented. The design of the whole distribution system can be decomposed into long term, medium term and short term decision-making problems. The heart of performed analysis is short term decision making – the vehicle routing problem itself. There were identified the most important variants of vehicle routing problems which need to be solved for the purposes of optimization of pick-up and delivery of small consignments.

Key words: optimization, vehicle routing problem, hub location problem

1. PŘEPRAVA KUSOVÝCH ZÁSILEK

V rámci celé České republiky funguje v podstatě ucelená síť určená pro přepravu kusových zásilek, ať už se jedná o síť jednotlivých dopravních firem, státních podniků, ale i specializovaných společností uskutečňujících přemístění jednorázových zakázkových zásilek.

Samostatné dopravní systémy k přepravě kusových zásilek ve střední Evropě začaly vznikat na začátku 90. let, protože před tím tuto přepravu zajišťovaly vesměs státní podniky, v tehdejší Československu - Československá pošta a ČS dráhy. V současnosti je na trhu obrovská konkurence, a to jak v rámci České republiky, tak v celosvětovém měřítku.

Široká škála možností přepravy menších a jednorázových zásilek vytvořila na trhu rozumnou konkurenci a tím i odpovídající kvalitu služby. Momentálně je na zákazníkovi, co přesně preferuje a co očekává od dopravce. Mezi nejčastější kritéria výběru patří rychlost, včasnost, spolehlivost, informovanost a v neposlední řadě také cena. Všechny tyto faktory nemálo ovlivňuje vhodný výběr dopravního prostředku, nejčastěji silničního vozidla.

¹ doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D., Ing. Miroslav Slivoně, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra technologie a řízení dopravy, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Tel.: +420 603 6199, E-mail: Jaromir.Siroky@upce.cz, Miroslav.Slivone@upce.cz

Preference silniční dopravy je logická hlavně z důvodu toho, že odpadají zdlouhavé nakládky a překládky jako u železnice. Dále má nespornou výhodu, co se týče včasnosti a hlavně dodání zásilky na určené místo v režimu „door to door“, kterého se v současných logistických systémech hodně využívá a je již nutnou podmínkou pro jejich efektivní fungování.

Z definice kusových zásilek, která se sice částečně liší u jednotlivých dopravců, plynou následující v podstatě všeobecně uznávané standardy parametrů a rozlišení těchto zásilek, a to:

- maximální parametry jednoho kusu – 4 x 2 x 1,7 m
- maximální hmotnost jednoho kusu je 1,5 t
- maximální objem u neskladných zásilek je 20 m³
- maximální hmotnost zásilky je 5 t

Silniční doprava je majoritně uplatňována pro přepravu kusových zásilek, ale jak dokládá příklad z Rakouska, i železnice si zde své místo najde. Významný evropský poskytovatel logistických řešení Tolimpex a logistické oddělení nákladní dopravy Rakouských spolkových drah (ÖBB) tzv. RCA Rail Cargo Austria přišly na trh s novou ekonomicky výhodnou službou přepravy kusových zásilek mezi Belgií, Lucemburskem a Rakouskem. Princip je následující, během pracovního dne jsou zásilky vyzvednuty například v Belgii a Lucembursku a následně dopraveny do logistického centra Tolimpexu v Antverpách, přerozděleny, poté rozvezeny do 13 distribučních center RCA v Rakousku. Z nich pak přes noc putují do domovských železničních stanic RCA a prostřednictvím železnice se dopravují na cílová místa. Dodací lhůta se pohybuje v rozmezí 24 až 72 hodin, vesměs však jde o příští pracovní den. Důležitý podíl na tom má i technologie nočního skoku, která zaručuje včasnost a minimalizaci technologického přerušování přepravy v rámci železniční dopravy. Tento koncept nabízí rychlé a relativně úsporné řešení přepravy kusových zásilek, ovšem otázkou je, nakolik lze obdobný systém aplikovat na Českou republiku a potencionální dopravce. Svoji roli hrají i jednotlivé relace a přepravní vzdálenosti, ačkoliv je to zajímavý příslib do budoucna pro přepravu kusových zásilek na větší vzdálenosti, nedá se předpokládat globální využití, hlavně pro menší vzdálenosti a rozličné hustoty evropské železniční dopravní sítě.

V rámci České republiky je situace jiná. Na trhu je několik významných a velkých přepravních firem, které se zaměřují právě na kusové zboží. Největší společností, a to i ve světovém měřítku, je DHL. Její působení má však výrazně mezinárodní charakter a zaměřuje se na expresní přepravu zásilek v kombinaci lodní a letecké dopravy. Právě u DHL je patrná diferenciací rozměrů jednotlivých zásilek, kde mají pevně stanoveny limity na 118 × 88 × 120 cm (délka × šířka × výška) v případě expresních dodávek. V programu tzv. Same Day zase nabízí vyzvednutí a doručení zásilek v nejkratším možném termínu. Služba je určena především pro časově citlivé zásilky, jejichž doručení je pro zákazníka prioritou. Při přepravě urgentních zásilek DHL zabezpečuje vypracování konkrétního dopravního řetězce pro danou situaci, tak aby maximálně vyhovoval zákaznickým požadavkům.

Profesionalita koncepčního řešení balíkové přepravy pod hlavičkou DHL se projevuje i v České republice. Nejenže poskytují kompletní informační službu, po celou dobu kdy je zásilka na cestě, ale i dále rozšiřují svoji dopravní síť. Novým distribučním terminálem

v Nemilanech u Olomouce se zefektivní překládkové operace spojené s rozvozem zásilek v podstatě po celé Moravě. Cílem tohoto projektu DHL a PPL je spojení terminálových sítí obou společností v rámci ČR. Výstavba znamenala začátek smělého projektu na jehož konci bude společná síť DHL a PPL s deseti distribučními terminály. Po Olomouci je naplánován terminál v Hradci Králové, Praze a rozšířeny budou i depa v Brně a Ostravě. DHL a PPL si od toho slibují navýšení kapacity, lepší dostupnost a hlavně zrychlení a zkvalitnění služeb.

Obě firmy úzce spolupracují a mají svá zastoupení ve většině velkých logistických centrech po celé republice, jako tomu je například v centru ČSAD Hodonín a Toptransu ve Šlapanicích na okraji Brna, kde mají PPL pronajatou část plochy pro své expresní zásilky.

DHL preferuje kompletní informovanost o přepravované zásilce, což je i jedno z kritérií při rozhodování zákazníka. Jednoduchým řešením, které přichází z Ameriky a má nahradit starší technologicky méně efektivní čárové kódy je tzv. RFID (Radio Frequency Identification), tedy identifikace pomocí radiové frekvence s rozšířenou možností využití nejen pro lokaci zásilky. Tento systém lze úspěšně nasadit v mnoha odvětvích a oblastech, kde je kladen důraz na co nejrychlejší a přesné zpracování informací a okamžitý přenos těchto načtených dat k následnému zpracování. Informace jsou v elektronické podobě ukládány do malých čipů - tagů, ze kterých je lze následně načítat a opakovaně přepisovat pomocí rádiových vln. Nespornou výhodou však je forma zpracování, kdy se nepostupuje po jednotlivých čteních, ale hromadně, přičemž rychlost se pohybuje ve stovkách za minutu. V současnosti jsou na trhu dvě základní verze pasivní a aktivní tagy. Pro oblast přepravy a identifikace kusových zásilek je jednoznačně výhodnější použití aktivních tagů, které mají radiový dosah až na 100 metrů. Použití RFID značení slouží i jako technologicky přidaná hodnota zásilce. Její masová výroba a použití se momentálně zastavila na jediném problému – výrobní ceně, ale výzkum předpokládá, že se bude v nejbližší době pohybovat na hranici pěti centů za kus. V takovém případě by už problematická nákladová stránka byla odstraněna a jejích výhod by se dalo využít hlavně v přepravě kusových zásilek, jako jednoduchého a účinného nosiče informací. Například DHL garantuje osobní dohled nad průběhem přepravy přes webové rozhraní nebo posíláním sms zpráv.

Dalším mezinárodně významným dopravcem na poli balíkových zásilek je společnost TNT express. Spektrum služeb je obdobné jako u DHL, dokonce některé mají i podobné označení (Same Day). Zabývá se hlavně menšími zásilkami, přepravou pošty prostřednictvím letecké dopravy. Své sídlo má v belgickém Liege odkud pravidelně každý týden startují B737 nebo BAe146 do Prahy a Brna a následně pak každý pracovní den probíhá sběrná linka mezi Brnem a Prahou. Obdobnou sběrnou linku má i DHL, které ji zavedlo v roce 2007 a jde o Ostravu – Lipsko.

Mezi českými společnostmi, zabývající se přepravou kusových zásilek, převládají firmy CSEXPRESSION, Radiálka, které se na tuto přepravu specializují. Dále to jsou například Setto spedition, EDIS Praha, CS cargo, Transportexpress – sběrná služba a další firmy převážně lokálního charakteru.

CS EXPRES a. s. Slatiňany provozuje expresní systém přepravy kusových zásilek prostřednictvím 22 oblastních středisek po celém území České republiky. Je třetím největším operátorem u nás. Ve spolupráci se smluvními partnery zajišťuje kompletní přepravu i do

zahraničí. Na základě požadavků zákazníka poskytuje přepravu s doručením během 24 hodin, do 5 dní a u zahraniční přepravy jsou dodací lhůty stanoveny pro každou relaci příslušné země zvlášť. Lhůta začíná plynout od 16 hodiny dne, kdy byla zásilka převzata k přepravě.

Naproti tomu, Radiálka je spediční firma, která je členem sdružení Transportexpres – sběrná služba (TEX SBS). Její hlavní činností je přeprava kusových zásilek v systému TEX – SBS pokrývající celé území ČR, a to včetně přímého napojení na Slovensko. Ve službě Superexpres zaručují dodání přes noc do 7. hodiny ranní v rámci určitého atrakčního obvodu. Následuje podobné rozdělení služeb jako u ostatních firem.

V oblasti kusových zásilek se nelze vyhnout i určitým sezónním výkyvům. V praxi se jedná o logicky zdůvodnitelné nepravidelnosti v poptávce. Hlavní podíl na jejich vzniku nese elektronický obchod a extrémní poptávkové křivky během roku. Klasickým příkladem sezónních výkyvů je předvánoční týden. Na příkladě statistik společnosti DPD z Francie je patrné, jak velký nápor na dopravní systém jednotlivých firem během takovýchto nepravidelností působí. V rámci jejich dopravního systému bylo poslední předvánoční den roku 2008 přepraveno až 430 tis. balíků, což znamenalo meziroční růst až o 24 %.

Pokud se zákazník z nebo do České republiky rozhodne přepravit kusové zboží, rozměrově menší zásilku, nabízí se mu široké spektrum potencionálních dopravců, spedičních firem, které se přímo specializují na kusové zásilky nebo nabízí přepravu v rámci svých možností přes smluvní partnery. Poskytují komfortní a plně zabezpečenou přepravu v režimu „door to door“ s možností expresních služeb. Dvě největší firmy operují po celém světě a v rámci České republiky mají ucelené sítě buď vlastních nebo smluvních logistických partnerů. Poskytují komplexní přepravu od vyzvednutí zásilky, přes celní administrativu a informace o aktuální poloze, po přesné navržení trasy a způsobu přepravy tzv. namíru.

Přes veškeré snahy a nová kombinační řešení, se stále ve většině případů využívá silniční dopravy pro celý logistický proces přepravy kusových zásilek a nelze předpokládat, že se situace v dohledné době v České republice změní i vzhledem k přepravním vzdálenostem a hustotě dopravních sítí ostatních druhů dopravy. Pro časově náročné a dálkové přepravy je pak ve světě volena vždy kombinace levnějšího dopravního módu s nákladnějším, ale rychlejším a flexibilnějším, tak aby byly zachovány zákaznickovy požadavky na kvalitu, přesnost a spolehlivost, ale také ekonomičnost a ekologičnost procesu.

2. OPTIMALIZACE SVOZU A ROZVOZU

Problém optimalizace svozu a rozvozu patří mezi matematické úlohy, kterým je již od začátku 60. let 20. století věnována velká pozornost. V rámci operačního výzkumu je problém označován jako kapacitně omezená úloha okružních jízd (v anglické literatuře jako Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP). V podstatě se jedná o kombinaci dvou jiných dobře známých problémů - úlohy obchodního cestujícího a ložného problému (tzv. bin packingu).

Obecný verbální model úlohy je možné formulovat takto: Je dáno jedno nebo několik centrálních dep, ze kterých vyjíždí množina vozidel s danou kapacitou, která může být stejná

nebo různá. Dále je známo umístění jednotlivých zákazníků (tj. vzdálenosti všech zákazníků od dep i vzájemné vzdálenosti zákazníků) a velikost jejich požadavků na obsluhu (tj. velikost objednávky v případě rozvozu, množství k odvozu v případě svozu). Cílem úlohy je většinou obsloužit všechny zákazníky s minimálními náklady; velikost těchto nákladů je přímo úměrná ujeté vzdálenosti, v některých případech může být zohledněn i počet použitých vozidel.

Z výše uvedené formulace je zřejmé, že jak rozmístění dep, tak případné přiřazení jednotlivých zákazníků ke konkrétnímu depu patří mezi vstupní data úlohy - tj. nejsou předmětem optimalizace při řešení úlohy okružních jízd. Za určitých okolností (návrh nového systému, restrukturalizace stávajícího systému, dlouhodobé plánování) však může být účelné zabývat se i lokací dep a následnou alokací zákazníků k depům. V tomto kontextu je možné rozlišovat tři úrovně rozhodovacích problémů, jejichž řešení ovlivňuje velikost nákladů vznikajících při zajišťování svozu a rozvozu v daném systému:

- strategické rozhodování - počet a rozmístění dep;
- taktické rozhodování - volba způsobu trasování, sestava atrakčních obvodů dep;
- operativní rozhodování - sestava denních tras vozidel.

2.1 STRATEGICKÉ ROZHODOVÁNÍ - LOKAČNÍ ÚLOHY

Úlohy o počtu a rozmístění svozně-rozvozních dep jsou řešeny v rámci dlouhodobého plánování, typickými příklady jsou návrh nového systému, navýšení / snížení kapacity stávajícího systému, různé restrukturalizace apod.; důsledky uskutečněných rozhodnutí lze realizovat v horizontu měsíců či let. Lokační úlohy opět patří mezi klasické problémy operačního výzkumu. Vzhledem k povaze svozně-rozvozní úlohy je důležité soustředit se především na problém hledání tzv. mediánu, což je označení takových úloh, ve kterých se hledá umístění dep minimalizující součet vážených vzdáleností zákazníků od příslušných dep. Váženou vzdáleností se rozumí součin vzdálenosti a váhy zákazníka.

V závislosti na struktuře zkoumaného systému je nutné zabývat se především dvěma důležitými typy úloh: úloha o hledání p-mediánu a úloha o hledání p-hub mediánu.

Úloha o hledání p-mediánu

Problémy lokace p-mediánu (p-median location problems) nacházejí velkého uplatnění v oblasti logistiky. Obsluhované objekty bývají váhově ohodnoceny, váha objektu reprezentuje například důležitost objektu nebo velikost jeho požadavků na obsluhu v daném období. Cílem úlohy je nalézt takové umístění střediska (nebo středisek), které minimalizuje součet vážených vzdáleností všech obsluhovaných objektů od nejbližšího střediska. V podstatě tedy jde o minimalizaci celkových přepravních nákladů na obsluhu všech objektů.

Příkladem takového typu problému může být umístění skladu nebo logistického centra. Pravděpodobně nejpopulárnějším problémem na hledání p-mediánu je tzv. Warehouse location problem, existuje však celá řada dalších známých problémů. S výjimkou úlohy na umístění jediného mediánu, se většinou jedná o NP těžké úlohy, na jejichž řešení se používají různé heuristické a metaheuristické algoritmy.

Úloha o hledání p-hub mediánu

Úloha o hledání p-hub mediánu je využitelná při řešení návrhu různých distribučních systémů. Přeprava je v uvažovaném systému organizována na principu hub-and-spoke, kdy je namísto přímé přepravy z výchozího uzlu do cílového uzlu využíváno terminálů, tzv. hubů. Pro daný přepravní systém je charakteristické, že je z velkého množství primárních zdrojů odesíláno relativně malé množství zásilek, které se vyplatí slučovat do větších dávek v terminálech budovaných v blízkosti zdrojů, poté je ve větších dávkách přepravovat do terminálů v blízkosti cílové destinace, tam je opět rozpouštět a přepravovat na místo určení. Výhoda organizace hub-and-spoke spočívá v koncentraci přepravních proudů do hubů, což umožňuje mezi huby přepravovat zásilky ekonomicky (vyšší objemy přeprav) a v přijatelných lhůtách (vyšší frekvence přeprav). Důsledkem zpracování elementů v hubech a možného prodloužení trasy však dochází k prodloužení doručovacích lhůt oproti přímé přepravě.

Cílem úlohy je navrhnout takové rozmístění hubů, aby byla minimalizována suma nákladů přes všechny realizované přepravy mezi jednotlivými dvojicemi objektů i a j . Náklady na přepravu jednotkového množství zboží mezi dvěma místy prostřednictvím hubů k a l jsou kalkulovány například podle vztahu:

$$c_{iklj} = d_{ik} + \alpha * d_{kl} + d_{lj} \quad (2.1)$$

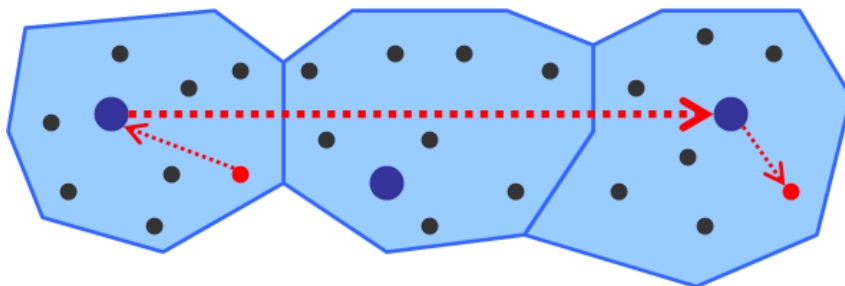
kde:

d_{ik}	je délka svozní části,
α	je faktor reflektující úsporu při přepravě mezi huby ($\alpha < 1$),
d_{kl}	je vzdálenost mezi huby,
d_{lj}	je délka rozvozní části.

Kalkulace nákladů podle vztahu (2.1) přirozeně nebude odpovídat skutečným přepravním nákladům, protože nezohledňuje jednotkové přepravní náklady (sazbu na jeden tunokilometr). Pro účely vzájemného porovnání různých variant rozmístění terminálů a vyhledání optimálního řešení uvedené lokační úlohy je však kalkulace podle (2.1) zcela dostačující.

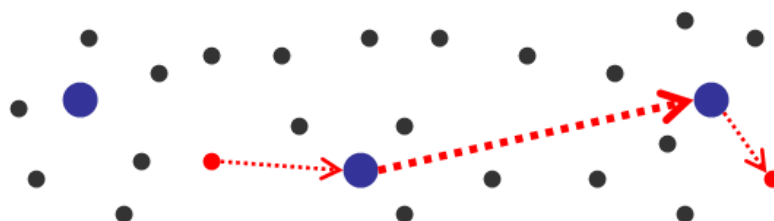
Stejně jako v případě úlohy o hledání p-mediánu i zde existuje celá řada modifikací základní úlohy. Huby například mohou nebo nemusí být kapacitně omezené, jejich počet může být buď předem daný, nebo (při znalosti fixních nákladů na vybudování a provoz hubu) mohou vystupovat jako neznámá v účelové funkci. Důležitou vlastností modelů je povaha alokace, která může být buď prostá nebo násobná. Při prosté alokaci jsou obsluhované objekty jednoznačně přiřazeny některému hubu. Při tzv. násobné alokaci mohou být objekty zařazeny do atrakčních obvodů hned několika (okolních) hubů současně. Výhodou násobné alokace je částečná eliminace „protisměrných“ přeprav a tudíž snížení hodnoty účelové funkce oproti alokaci prosté; nevýhodou je pak složitější organizace systému (svoz resp. rozvoz není pro konkrétní obsluhovaný objekt realizován prostřednictvím stále stejného hubu tak jako v případě prosté alokace, volba příslušné dvojice hubů záleží na konkrétní relaci výchozího objektu i a cílového objektu j).

Také problémy lokace hubů patří mezi složité NP-těžké problémy. Bývají řešeny s využitím metod matematického programování a různých metaheuristik (zakázané prohledávání, genetické algoritmy, simulované žíhání).



Zdroj: autoři

Obr. 1: Schematické znázornění prosté alokace v hub-and-spoke systému



Zdroj: autoři

Obr. 2: Schematické znázornění násobné alokace v hub-and-spoke systému

2.2 TAKTICKÉ ROZHODOVÁNÍ - ÚLOHY RAJONIZACE, VOLBA ZPŮSOBU TRASOVÁNÍ

Do úrovně taktického plánování je možné zařadit například rozhodování o tom, z jakého depa budou obsluhováni jednotliví zákazníci. Rozhodnutí uskutečněná v rámci taktického plánování lze realizovat obecně v horizontu týdnů až měsíců. Tato úloha se běžně nazývá úloha rajonizace (allocation problem). Potřeba řešit úlohu rajonizace vzniká v průběhu životního cyklu již vybudovaného distribučního systému s omezenými kapacitami dep z důvodů, kterými mohou být změny v množině zákazníků (získání nových / ztráta stávajících zákazníků) či změny v objemu množství požadovaného jednotlivými zákazníky.

Jiným příkladem taktického rozhodování je volba způsobu obsluhy zákazníků, způsobu trasování a rozvrhování (viz typy úloh okružních jízd) či přechod od prosté alokace zákazníka k depu k alokaci násobné v případě hub-and-spoke systémů.

Porovnání prosté a násobné alokace v hub-and-spoke systémech

Na základě rozboru reálných problémů se ukazuje, že násobná alokace může za určitých podmínek přinést značné úspory. Velikost úspor je ovlivněna především hodnotou koeficientu α reflektujícího výši úspory při přepravě mezi huby – viz vztah (2.1).

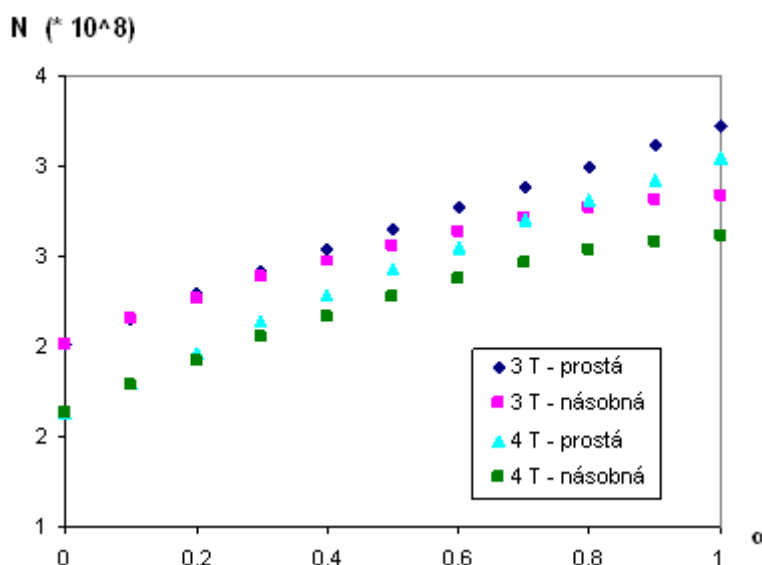
Pro ověření rozdílu ve výši přepravních nákladů v případě prosté a násobné alokace byly analyzovány 3 rozdílné soubory dat. Konkrétně se jednalo o dva datové soubory, které

se běžně používají k testování lokačních úloh (tzv. CAB a AP soubory), a dále pak soubor obsahující údaje o velikosti primárních vozových proudů přepravovaných společností ČD, a.s. v počtech vozových zásilek mezi obvodem odesílací uzlové železniční stanice a obvodem uzlové železniční stanice určený v období od 1.1.2007 do 31.8.2007.

Analýza byla provedena s využitím autory vytvořeného software HubLoc; a to pro různé velikosti koeficientu α , přičemž počet terminálů byl stanoven na 3 a 4. Podrobnosti k provedenému porovnání jsou uvedeny v článku [6]. Přepavní náklady byly počítány dle vztahu (2.1). Ve všech třech případech bylo dosaženo velice podobných závěrů, které se dají sumarizovat takto:

- Při stejném počtu terminálů jsou přepravní náklady v případě násobné alokace vždy nižší nebo stejné v porovnání s alokací prostou. Stejně jsou náklady pouze v případě nulové velikosti koeficientu α (tj. přeprava mezi terminály je zdarma); s rostoucí hodnotou koeficientu α (tj. snižující se velikostí úspory nákladů na přepravu mezi terminály; tyto náklady se přibližují přepravním nákladům dosahovaným ve svozní a rozvozní části přepravy) roste rozdíl v celkových přepravních nákladech uvažovaných typů alokace – a to ve prospěch alokace násobné.
- Pro malé hodnoty koeficientu α mají oba modely alokace tendenci přiřazovat zákazníka vždy k nejbližšímu terminálu; se zvyšující se hodnotou α tento trend ustupuje – a to u obou typů alokace. I u prosté alokace nemusí být vždy nejvýhodnější obsluhovat zákazníka z nejbližšího terminálu – závisí na směřování přepravních proudů.
- Se zvyšující se hodnotou koeficientu α roste počet zákazníků, které je výhodnější obsluhovat z více terminálů (tedy nikoli prostou alokací).
- Se zvyšující se hodnotou koeficientu α roste podíl vzdálenosti mezi terminály na celkových nákladech. V takových případech mají lokační modely tendenci nalézat řešení, ve kterých leží terminály blíže u sebe (ve srovnání s případy s nižší hodnotou α).

Vývoj hodnoty účelové funkce, tzn. součtu přepravních nákladů na obsluhu kalkulovaných podle vztahu (2.1), je pro modelový příklad vycházející z výše zmiňovaných údajů o velikosti železničních přeprav znázorněn na obr. 3. Z vodorovné osy grafu lze odečíst hodnotu koeficientu α (od 0 do 1), na svislé ose lze odečíst hodnotu účelové funkce pro jednotlivé způsoby alokace (násobná, prostá) a daný počet terminálů (3 nebo 4).



Zdroj: autoři

Obr. 3: Modelový příklad - vývoj přepravních nákladů pro různé konfigurace úlohy

Je zřejmé, že v případech s poměrně vysokou hodnotou koeficientu α , kdy jednotkové náklady na přepravu mezi terminály nejsou výrazně nižší než náklady na svoz a rozvoz, může být model s nižším počtem terminálů a násobnou alokací dokonce výhodnější než model s vyšším počtem terminálů a alokací prostou. Takové situace je dosaženo i v případě uvedeného modelového příkladu, kdy pro hodnoty $\alpha \geq 0,75$ jsou náklady modelu se 3 terminály při násobné alokaci nižší než náklady modelu se 4 terminály a prostou alokací.

2.3 OPERATIVNÍ ROZHODOVÁNÍ - ÚLOHY OKRUŽNÍCH JÍZD

Vlastní sestava tras vozidel – tedy okružních jízd, patří do úrovně operativního rozhodování. Tento typ úloh je potřeba řešit denně tak, jak se mění struktura denních objednávek zákazníků. V praxi je žádoucí umět danou úlohu vyřešit ve velice krátké době (maximálně během několika minut), protože jen tak se dá rychle reagovat na objednávku zákazníka.

Existuje celá řada kritérií, která vymezují konečnou podobu konkrétní úlohy okružních jízd. Mezi tato kritéria patří například:

- čas uspokojování zákazníků (není určen, dán časovými okny, pevně určen);
- počet dep (jedno, více);
- typ dopravního parku (homogenní, heterogenní);
- povaha požadavků (deterministické, stochastické);
- typ prováděné operace u zákazníka (nakládka, vykládka, obojí), aj.

Nejdůležitější varianty úlohy okružních jízd jsou představeny dále v textu.

Kapacitně omezená úloha okružních jízd (Capacitated Vehicle Routing Problem)

Klasickou kapacitně omezenou úlohu okružních jízd je možné verbálně formulovat například takto: Je dáno umístění střediska s a množina zákazníků J ; přičemž jsou známy

vzájemné vzdálenosti d_{ij} mezi uvažovanými objekty (tj. zákazníky a depem) na dopravní síti. Dále jsou známy denní požadavky jednotlivých zákazníků b_j . K obsluze zákazníků je k dispozici množina vozidel R , každé o kapacitě K_r . Každé vozidlo vyjede z depa a opět se do něj musí vrátit, každé vozidlo smí být použito pouze jednou a každý zákazník musí být uspokojen jedinou jízdou vozidla. Cílem je navrhnout takovou množinu tras vozidel (okružních jízd), aby jejich celková délka byla minimální.

Pro účely sestavení matematické modelu je třeba zavést proměnné $x_{ijr} \in \{0, 1\}$ pro každé vozidlo $r \in R$ a každou dvojici objektů (i, j) modeluje rozhodnutí, zda vozidlo r pojede od objektu i k objektu j (v tom případě $x_{ijr} = 1$), nebo nikoli ($x_{ijr} = 0$). Vlastní matematický model pak vypadá následovně:

$$\text{minimalizovat} \quad \sum_{r \in R} \sum_{i \in J'} \sum_{\substack{j \in J' \\ i \neq j}} d_{ij} x_{ijr} \quad (2.2)$$

$$\text{za podmínek} \quad \sum_{r \in R} \sum_{\substack{i \in J' \\ i \neq j}} x_{ijr} = 1 \quad \text{pro } j \in J \quad (2.3)$$

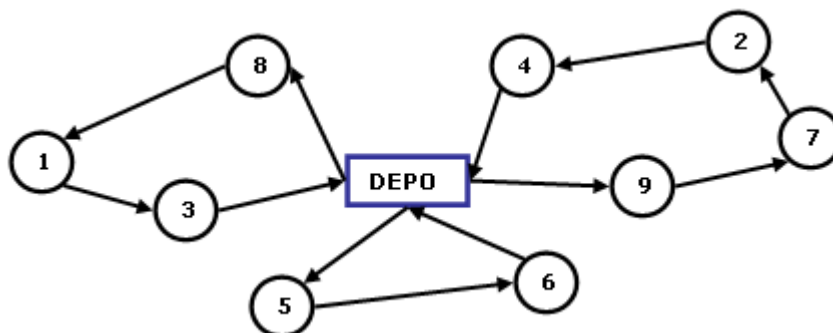
$$\sum_{\substack{i \in J' \\ i \neq j}} x_{ijr} = \sum_{\substack{i \in J' \\ i \neq j}} x_{jir} \quad \text{pro } j \in J \cup s, r \in R \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in J} b_j \sum_{\substack{i \in J' \\ i \neq j}} x_{ijr} \leq K_r \quad \text{pro } r \in R \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{\substack{i \in S \\ i \neq j}} x_{ijr} \leq |S| - 1 \quad \text{pro } r \in R, S \subseteq J, |S| \geq 2 \quad (2.6)$$

$$x_{ijr} \in \{0, 1\} \quad \text{pro } r \in R, i \in J \cup s, j \in J \cup s, i \neq j \quad (2.7)$$

Účelová funkce (2.2) vyjadřuje celkovou najetou vzdálenost. Podmínky (2.3) zajišťují, že každý zákazník bude obsloužen právě jednou. Podmínky (2.4) zabezpečují to, že každé vozidlo, které do uzlu j vjede, z něho také vyjede. Podmínky (2.5) zajišťují, že požadavky zákazníků přiřazených vozidlu r nepřesáhnou jeho kapacitu. Tzv. anticyklické podmínky (2.6) zabezpečují, aby trasa vozidla tvořila uzavřený sled objektů, přičemž žádný z nich se neopakuje a trasa prochází umístěním skladu s (podmínek tohoto typu bude velké množství – podmínka musí být napsána pro každou vlastní podmnožinu množiny zákazníků kromě jednoprvkových podmnožin).



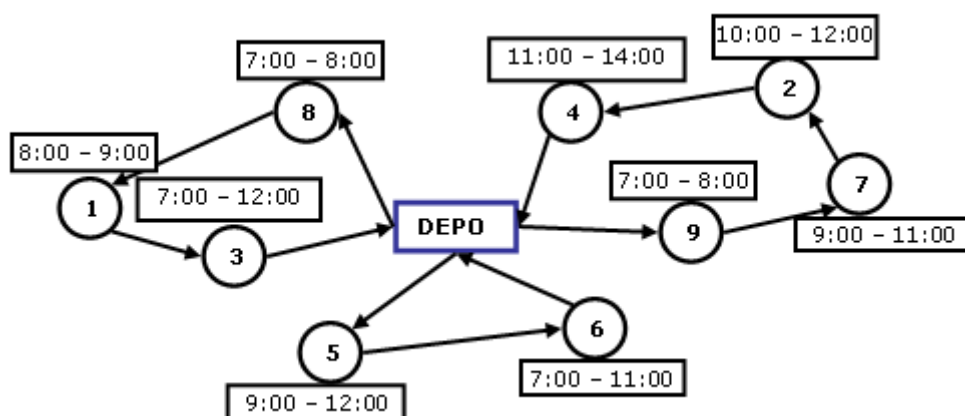
Zdroj: autoři

Obr. 4: Schematické znázornění klasické úlohy okružních jízd

Úloha okružních jízd s časovými okny (Vehicle Routing Problem with Time Windows)

Na úlohu s časovými okny je možné pohlížet jako na kombinaci úlohy okružních jízd a problému rozvrhování. Jedná se o rozšíření základní úlohy o tzv. časová okna – pro každého zákazníka je specifikován časový interval, ve kterém je možné zákazníka navštívit. Praktická aplikace je zřejmá (omezená provozní doba ve skladu zákazníka, potřeba obdržet objednávku do určitého času apod.).

Existuje také varianta této úlohy s tzv. měkkými časovými okny (soft time windows) – v takové úloze je dovolené časová okna porušovat, každé takové porušení je penalizováno.



Zdroj: autoři

Obr. 5: Schematické znázornění úlohy okružních jízd s časovými okny

Úloha se současným svozem i rozvozem (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up Service)

Jedná se opět o variantu základní úlohy, pro kterou je specifické, že každé vozidlo může provádět svoz i rozvoz současně. V závislosti na konkrétním požadavku zákazníka se tedy u některých zákazníků pouze nakládá, u některých pouze vykládá a u některých se provádí obě činnosti. Přirozeně je opět nutné přihlížet ke kapacitním omezením dané trasy (kapacita vozidla, maximální trvání trasy).

Úloha s více depy (Multi Depot Vehicle Routing Problem)

V případě, že sice existuje více dep, ale zákazníci jsou striktně rozděleni do atrakčních obvodů těchto dep, stačí pouze vyřešit několik klasických úloh okružních jízd (pro každé depo jednu). Pokud však jednotlivá depa nemají přidělen atrakční obvod, jedná se o úlohu s více depy. Každé depo má přidělený určitý počet vozidel, cílem je obsloužit množinu zákazníků s minimálními náklady tak, aby se každé vozidlo vrátilo zpět do svého mateřského depa. Tento způsob obsluhy přirozeně není využitelný pro svoz a rozvoz adresných kusových zásilek, kdy je potřeba doručit zákazníkovi konkrétní zásilku (např. přepravní systémy organizované systémem hub-and-spoke). Řešení úlohy s více depy je tak vhodné například v různých systémech distribuce zboží, ve kterých si zákazník přímo vytvoří objednávku a ta je

mu zaslána z některého z distribučních skladů, který disponuje zbožím požadovaných parametrů a v požadovaném množství.

2.4 PŘÍSTUPY K ŘEŠENÍ ÚLOH OKRUŽNÍCH JÍZD

Všechny uvedené varianty úlohy okružních jízd patří mezi složité kombinatorické problémy, ve všech případech se jedná o NP těžké úlohy. Už z jejich podstaty vyplývá nemožnost nalézt řešení rozsáhlejších instancí úloh pomocí exaktních metod – pro řešení praktických problémů je nutné použít heuristické metody, pomocí kterých je obecně nalezeno nějaké přijatelně dobré (tj. suboptimální) řešení.

Menší instance úloh bývá možné řešit exaktně – využívají se metody založené na principu větví a hranic (branch and bound) a větví a řezů (branch and cut).

Mezi klasické heuristiky, které se používají k řešení úloh okružních jízd, patří metody založené na výhodnostních koeficientech (např. známá Clark-Wrightova metoda), různé výměnné metody (vzájemné prohození částí trasy mezi dvěma vozidly) a především tzv. dvoufázové přístupy. Dvoufázové přístupy dekomponují úlohu na dvě části: úlohu shlukování (clustering), která se zabývá zařazením zákazníků do trasy, a úlohu trasování (routing), jejíž podstatou je sestava trasy (tedy pořadí zákazníků v trase – v podstatě se jedná o úlohu obchodního cestujícího). Dvoufázové přístupy se dále dělí na metody primárního shlukování (Cluster-First, Route-Second), mezi něž patří například stírací algoritmus či algoritmus Petal, a metody primárního trasování (Route-First, Cluster-Second).

V poslední době klasické heuristiky ustupují metaheuristickým metodám, které se začaly masivně prosazovat společně s nárůstem výpočetního výkonu počítačů. Tyto metody produkují výsledky daleko vyšší kvality ve srovnání s klasickými heuristikami. Jejich výhodou je schopnost za určitých okolností opustit nalezený lokální extrém účelové funkce, což je vlastnost, která klasickým heuristikám chybí. Mezi metaheuristiky používané pro řešení úloh okružních jízd patří: genetické algoritmy, simulované žíhání (Simulated Annealing), zakázané prohledávání (Tabu Search) a optimalizace Ant Colony.

2.5 SOFTWAREVÉ PROSTŘEDKY K ŘEŠENÍ ÚLOH OKRUŽNÍCH JÍZD

Rozvoj komerčního software určeného pro optimalizaci okružních jízd se datuje k začátku 80. let 20. století, přičemž aktuální verze některých z produktů vzniklých v této době jsou úspěšně využívány dodnes (ORTEC, Roadnet Transportation Suite, TruckStops Routing and Scheduling, LogiX Suite). Zavedení software pro plánování okružních jízd může dopravcům přinést značné úspory přepravních nákladů, konkrétní velikost úspor udávají různé studie v rozmezí cca 5 – 20 %; taková čísla mohou v závislosti na velikosti realizovaných objemů přepravy znamenat také značné snížení ekologické zátěže.

Mezi základní schopnosti soudobého software pro optimalizaci okružních jízd patří:

- řešení různých typů úloh okružních jízd;

- spolupráce s digitálními mapami, přiřazení geografické polohy k adrese;
- výpočet optimální trasy (včetně trasy na území měst);
- prezentace výsledků na mapě i v tabelární formě.

Dominantní platformou je MS Windows, ale objevují se i produkty běžící na Linuxu, Unixu, Mac OS, v poslední době se masivně prosazuje trend nasazení webových aplikací, ASP a J2EE.

Vývojářské firmy většinou nesdělují podrobnosti o použitých algoritmech, často používají vlastní heuristické algoritmy, v masivní míře je používáno metaheuristik. Čas výpočtu problému s 50 vozidly, 1 000 zákazníky a dvouhodinovými časovými okny se pohybuje mezi 1 až 10 minutami.

Každý program umí pracovat s obsluhou zákazníků umístěných v uzlech (tzv. node routing); jen asi každý druhý softwarový produkt dokáže také pracovat s trasováním při obsluze úseků (tzv. arc routing). Arc routing je výhodný v případě, kdy je počet zákazníků zařazených do jedné trasy vyšší než cca 100 (např. svoz komunálního odpadu, rozvoz pošty) – místo posloupnosti jednotlivých míst, která mají být obsloužena, se pracuje s posloupností ulic, resp. jejich segmentů. Samozřejmostí není ani práce s měkkými časovými okny, mnoho produktů sice uvádí jejich podporu, ale rozumí tím pouze maximální tolerované zpoždění.

Důležitou vlastností soudobého software je těsná integrace s mobilními telefony a systémem GPS, což umožňuje sledování vozidel v reálném čase.

Tab. 1: Některé komerčně úspěšné softwarové produkty

<i>1 000 a více uživatelů</i>	ArcLogistics Route (ESRI) Roadnet Transportation Suite (UPS Logistics Technologies) TruckStops Routing and Scheduling Software (MicroAnalytics) Prophesy Total Transportation System (Prophesy Transportation Solutions)
<i>500 – 1000 uživatelů</i>	Descartes Routing and Scheduling (The Descartes Systems Group) Direct Route (Appian Logistics Software) TourSolver for MapPoint / MapInfo Pro (Magellan Ingenierie) JOpt.SDK (DNA Evolutions) ORTEC Routing and Scheduling (ORTEC) Paragon Routing and Scheduling Systems (Paragon Software Systems)
<i>100 – 500 uživatelů</i>	STARS 5.0 (SAITECH) The LogiX Suite (Distribution Planning Software Limited)

Zdroj: [12]

Většina softwarových produktů není univerzální - dominantou je určitý typ zákazníků; funkčnost software se často upravuje zákazníkovi na míru. Výjimkou jsou produkty ArcLogistics Route (ESRI) a ILOG Dispatcher (ILOG), které disponují knihovnamy konfigurovatelných algoritmů. Cena software se typicky stanovuje na míru zákazníkovi,

rozhoduje počet instalací, míra požadovaných úprav, v licenčních podmínkách často figuruje velikost vozového parku zákazníka. Cena nejlevnějších produktů začíná na cca 10 tis. USD.

3. ZÁVĚR

Příspěvek se věnoval identifikaci modelů a metod vhodných pro řešení různých typů úlohy okružních jízd. Protože z dlouhodobého hlediska je možné zasahovat do počtu dep, jejich umístění a skladby atrakčních obvodů, byly do analýzy zahrnuty také lokační úlohy a úlohy rajonizace. Z tohoto pohledu je možné definovat ve svozně-rozvozní systémech problémy strategického, taktického a operativního rozhodování. Jádrem provedené analýzy je rozhodování operativní – tedy vlastní sestava tras vozidel. Byly identifikovány nejdůležitější varianty úlohy okružních jízd, které jsou využitelné pro řešení praktických úloh svozu a rozvozu malých zásilek.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ŠMÍDL [online]. [cit. 2008-01-09]. Dostupné z <<http://www.smidl.cz>>.
- [2] PAVLÍČEK, F. a kolektiv Technologie a řízení dopravy IV. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1999. ISBN 80-7194-182-4.
- [3] VOLEK, J. Operační výzkum I. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002, ISBN 80-7194-410-6.
- [4] PERNICA, P. a kolektiv Doprava a zasílatelství. Praha: ASPI Publishing, 2001, ISBN 80-863951-8.
- [5] EISLER, J. Podniky a podnikání v dopravě. Praha: VŠE v Praze, 2000, ISBN 80-245-0111-2.
- [6] MELICHAR, V., JEŽEK, J. Ekonomika dopravního podniku. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004, ISBN 80-7194-711-3.
- [7] PPL [online]. [cit. 2008-01-09]. Dostupné z <<http://www.ppl.cz>>.
- [8] TNT [online]. [cit. 2008-01-09]. Dostupné z <<http://www.tninnight.cz>>.
- [9] DHL Czech Republic [online]. [cit. 2008-01-09]. Dostupné z <<http://www.dhl.cz>>.
- [10] Radiálka [online]. [cit. 2008-31-10]. Dostupné z <<http://www.radialka.cz>>.
- [11] CS Expres [online]. [cit. 2008-31-10]. Dostupné z <<http://www.csexpres.cz>>.
- [12] HALL, R., PARTYKA, J. On the Road to Mobility – 2008 survey of vehicle routing software. [online]. [cit. 2009-10-12]. Dostupné z <<http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-2-08/vrss.html>>.
- [13] JANÁČEK J. Optimalizace na dopravních sítích. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2006, ISBN 80-8070-586-0.
- [14] VRP Web. [online]. [cit. 2009-10-12]. Dostupné z <<http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>>.
- [15] PEREIRA, F.B., TAVARES, J., MACHADO, P. COSTA, E. GVR: a New Genetic Representation for the Vehicle Routing Problem. Proceedings of the 13th Irish

- Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science. Limerick, Ireland: Springer-Verlag, 2002.
- [16] BRÄYSY, O., GENDREAU M. Genetic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Internal Report STF42 A01021, SINTEF Applied Mathematics, Department of Optimization, Oslo, Norway, 2001.
- [17] RALPHS, T.K., KOPMAN, L., PULLEYBLANK, W.R., TROTTER L.E. Jr. On the Capacitated Vehicle Routing Problem. Mathematical Programming. Springer Berlin / Heidelberg, 2003.
- [18] SOLOMON, M. M. Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Transportation Science, 29(2), 1995.
- [19] O'KELLY M.E., BRYAN, D., SKORIN-KAPOV, D., SKORIN-KAPOV J. Hub Network Design with Single and Multiple Allocation: A Computational Study. Location Science vol.4(3),1996.
- [20] KRATICA, J., STANIMIROVIC, Z., TOSIC, D., FILIPOVIC, V. Two Genetic Algorithms for Solving the Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem, European Journal of Operational Research 182, 2006.
- [21] TOPCUOGLU, H., CORUT, F., ERMIS, M., YILMAZ, G. Solving the Uncapacitated Hub Location Problem Using Genetic Algorithms, Computers & Operations Research 32, 2005.
- [22] BEASLEY, J.E. OR Library [online].
<<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>>.
- [23] ŠIROKÝ, J., SLIVONĚ, M., CEMPÍREK, V., Centra nákladní dopravy a jejich optimalizace na vybrané dopravní síti, Perner's Contacts 2, 2008.
- [24] SLIVONĚ, M., Řešení problému lokace hubů pomocí genetického algoritmu, Perner's Contacts 4, 2008.

Příspěvek vznikl za podpory projektů Ministerstva dopravy s názvem „Optimalizace svozu a rozvozu malých zásilek s využitím silniční a železniční dopravy“ (číslo CG932-019-520) a projektu Institucionálního výzkumu MSM 0021627505 „Teorie dopravních systémů“.